УДК 536.46 : 533.6

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ И ГОРЕНИЕ ПОРИСТОГО ПРОДУВАЕМОГО СЛОЯ ОТХОДОВ ДЕРЕВООБРАБОТКИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

Г.Н. Исаков, А.Н. Субботин

Томский политехнический университет
E-mail: subbot@inbox.ru

Показано, что в зависимости от создаваемых условий тепломассообмена в пористом слое древесных отходов реализуются низко- и высокотемпературный режимы горения, и режим тления, при котором основная масса газообразных компонентов, образующихся при пиролизе, выбрасывается в атмосферу, не сгорая. С помощью математической модели, рассмотренной в работе, можно прогнозировать режимы сжигания пористых, коксующихся отходов и определять состав образующихся при этом газообразных продуктов.

Самым распространенным способом утилизации строительных отходов является их сжигание в волне горения [1, 2]. Проблема утилизации отходов с оптимальными экологическими последствиями является актуальной и сводится к выбору тепломассообменных режимов воздействия на топливо, чтобы количество вредных газов в продуктах сгорания было минимальным.

В данной работе рассматриваются процессы утилизации отходов деревообработки в вертикальной цилиндрической печи заданных размеров.

Физико-математическая модель. Предположим, что твердое пористое топливо (отходы деревообработки) помещено в расположенную вертикально цилиндрическую печь. Обозначим высоту слоя топлива через h. После загрузки осуществляется продувка печи высокоэнтальпийным газовым потоком.

Будем считать, что процессы сушки и пиролиза твердого горючего описываются уравнениями вида:

$$\nu_2 M_2 \rightarrow \nu_2' M_2' - q_L,$$

$$\nu_1 M_1 \rightarrow \nu_3' M_3 + \nu_4' M_4 + \sum_{\alpha=2}^{6} \nu_{5\alpha}' M_{5\alpha} + q_P.$$

Здесь $\nu_1 M_1$ – масса древесных отходов, $\nu_2 M_2$ – воды, $\nu_2' M_2'$ – водяного пара; $\nu_3' M_3$ – кокса, $\nu_4' M_4$ – золы, $\nu_{5\alpha}' M_{5\alpha}$ – α-компоненты газовой фазы, образующейся при пиролизе древесины.

Кроме данных реакций учитывались гетерогенная реакция горения кокса и гомогенные реакции окисления оксида углерода, водорода и метана:

$$\mathrm{C} + \mathrm{O_2} = \mathrm{CO_2} + q_{\mathrm{C}}, \quad 2\mathrm{CO} + \mathrm{O_2} = 2\mathrm{CO_2} + q_{\mathrm{CO}},$$

$$2\mathrm{H_2} + \mathrm{O_2} = 2\mathrm{H_2O} + q_{\mathrm{H_2}},$$

$$\mathrm{CH_4} + 2\mathrm{O_2} = \mathrm{CO_2} + 2\mathrm{H_2O} + q_{\mathrm{CH_4}}.$$

В приведенных выше формулах q_L, q_P, q_{C}, q_{CO}, $q_{\mathrm{H_2}}$, $q_{\mathrm{CH_4}}$ – тепловые эффекты реакций испарения воды, пиролиза древесины, окисления кокса, оксида углерода, водорода и метана соответственно.

В силу цилиндрической симметрии физической задачи математическая модель, описывающая данный процесс, была записана в цилиндрической системе координат. Теплообмен на боковой поверхности на входном и выходном сечении рассчитывались с использованием граничных условий третьего рода. Предполагая, что изменение искомых функций по радиусу значительно меньше, чем вдоль оси печи уравнения осреднялись по радиусу, в результате была получена следующая система уравнений:

- сохранения массы исходного конденсированного вещества

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_P, \quad R_P = k_P \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_P}{RT_S}\right), \qquad (1)$$

- сохранения массы воды в связанном состоянии

$$\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_L\,, \quad R_L = k_L \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_L}{RT_S}\right), \quad (2)$$

- сохранения массы кокса

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_{\mathrm{C}} R_P - sR_{\mathrm{C}},$$

$$R_{\mathrm{C}} = \frac{M_{\mathrm{C}}}{M_{\mathrm{O}_2}} \rho_5 \varphi_5 c_1 k_{\mathrm{C}} \varphi_3 \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{C}}}{RT_S}\right), \quad (3)$$

- сохранения массы золы

$$\rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = \alpha_S R_P, \quad \alpha_{\mathrm{C}} = \frac{\nu_3' M_3}{\nu_1 M_1}, \quad \alpha_S = \frac{\nu_4' M_4}{\nu_1 M_1}, \quad (4)$$

- неразрывности газовой фазы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 v) = \alpha_G R_P + R_L + sR_{\mathrm{C}},$$

$$\alpha_G = \sum_{\alpha=2}^{5} \frac{\nu_{5\alpha}' M_{5\alpha}}{\nu_1 M_1}, \quad (5)$$

- сохранения массы α-компоненты газовой фазы

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_5 \varphi_5 c_\alpha v) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial z}\left(\rho_5 \varphi_5 D_\alpha \frac{\partial c_\alpha}{\partial z}\right) + R_{5\alpha} + sR_{5\alpha\,\mathrm{C}},$$

$$\alpha = \overline{1,6}, \quad \sum_{\alpha=1}^{7} c_\alpha = 1, \quad (6)$$

- сохранения энергии газовой и конденсированной фазы

$$\rho_5 \varphi_5 c_{p5}\left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{\partial}{\partial z}\left((\lambda_5 \varphi_5 + \lambda_R)\frac{\partial T}{\partial z}\right) +$$

$$+ q_{\mathrm{CO}} R_{\mathrm{CO}} + q_{\mathrm{H}_2} R_{\mathrm{H}_2} + q_{\mathrm{CH}_4} R_{\mathrm{CH}_4} - A_S (T - T_S) -$$

$$-\frac{2}{r_0}\alpha_1 \varphi_5 (T - T_S), \quad \lambda_5 = \sum_{\alpha=1}^{7} \lambda_{5\alpha} c_\alpha\,, \ \lambda_R = \frac{16 \sigma T^3}{s}, \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^{4} \rho_i \varphi_i c_{pi} \frac{\partial T_S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z}\right) + q_P R_P + q_{\mathrm{C}} sR_{\mathrm{C}} -$$

$$- q_L R_L + A_S (T - T_S) + \frac{2}{r_0}\alpha_1 \varphi_5 (T - T_S) -$$

$$- \frac{2 r_1}{r_0^2}[\alpha_2 (T_S - T_E) + q_R]\,,$$

$$\lambda_S = \sum_{i=0}^{4} \lambda_i \varphi_i\,, \quad c_{P5} = \sum_{i=1}^{7} c_{p\alpha} c_\alpha\,, \quad (8)$$

- движения газа в порах (в форме квадратичного закона фильтрации) и уравнение состояния

$$v = -\frac{k}{\mu + k\beta\rho_5 |v|}\left(\frac{\partial p}{\partial z} + \rho_5 g\right), \quad p = \frac{\rho_5 RT}{M_5},$$

$$M_5 = 1 \Big/ \sum_{\alpha=1}^{7} \frac{c_\alpha}{M_{5\alpha}}. \quad (9)$$

Система уравнений (1–9) решалась при следующих краевых условиях:

$$t = 0: \begin{cases} \varphi_i = \varphi_{iH}\,, \ i = \overline{1,4}\,, \ c_\alpha = c_{\alpha H}\,, \ \alpha = \overline{1,6}\,, \\ T = T_S = T_H\,, \quad p = p_H\,, \end{cases} \quad (10)$$

$$z = 0: T = T_E\,, \ p = p_E\,, \ \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z} = \alpha_1 (T_S - T_E), \ c_\alpha = c_{\alpha E}\,,$$

$$z = h: \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \ p = p_H\,, \ \lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial z} = \alpha_1 (T_S - T)\,. \quad (11)$$

В уравнениях (6–8) введены краткие обозначения скоростей реакций

$$R_{\mathrm{CO}} = M_{\mathrm{CO}} T^{-2,25} k_{\mathrm{CO}} \left(\frac{c_1 M_5}{M_{\mathrm{O}_2}}\right)^{0,25} \left(\frac{c_2 M_5}{M_{\mathrm{CO}}}\right) \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{CO}}}{RT}\right),$$

$$sR_{51\mathrm{C}} = -\frac{M_{\mathrm{O}_2}}{M_{\mathrm{C}}} sR_{\mathrm{C}}, \quad R_{52\mathrm{C}} = 0,$$

$$R_{\mathrm{H}_2} = M_{\mathrm{H}_2} k_{\mathrm{H}_2} \frac{\rho_5 c_1}{M_{\mathrm{O}_2}} \left(\frac{\rho_5 c_4}{M_{\mathrm{H}_2}}\right)^{1,5} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{H}_2}}{RT}\right),$$

$$R_{51} = -\frac{M_{\mathrm{O}_2}}{2 M_{\mathrm{CO}}} R_{\mathrm{CO}} - \frac{2 M_{\mathrm{O}_2}}{M_{\mathrm{CH}_4}} R_{\mathrm{CH}_4} - \frac{M_{\mathrm{O}_2}}{M_{\mathrm{H}_2}} R_{\mathrm{H}_2},$$

$$R_{\mathrm{CH}_4} = M_{\mathrm{CH}_4} k_{\mathrm{CH}_4} \frac{\rho_5 R}{M} \left(\frac{c_1 M_5}{M_{\mathrm{O}_2}}\right)^{1,5} \left(\frac{c_5 M_5}{M_{\mathrm{CH}_4}}\right)^{-0,5} \exp\left(-\frac{E_{\mathrm{CH}_4}}{RT}\right),$$

$$R_{52} = \alpha_{\mathrm{CO}} R_{\mathrm{п}} - R_{\mathrm{CO}}, \quad R_{54\mathrm{C}} = 0,$$

$$R_{53} = \alpha_{\mathrm{CO}_2} R_{\mathrm{п}} + \frac{M_{\mathrm{CO}_2}}{M_{\mathrm{CO}}} R_{\mathrm{CO}} + \frac{M_{\mathrm{CO}_2}}{M_{\mathrm{CH}_4}} R_{\mathrm{CH}_4},$$

$$sR_{53\mathrm{C}} = \frac{M_{\mathrm{CO}_2}}{M_{\mathrm{C}}} sR_{\mathrm{C}}, \quad R_{54} = \alpha_{\mathrm{H}_2} R_{\mathrm{P}} - R_{\mathrm{H}_2},$$

$$R_{55} = \alpha_{\mathrm{CH}_4} R_{\mathrm{P}} - R_{\mathrm{CH}_4}, \quad R_{55\mathrm{C}} = 0,$$

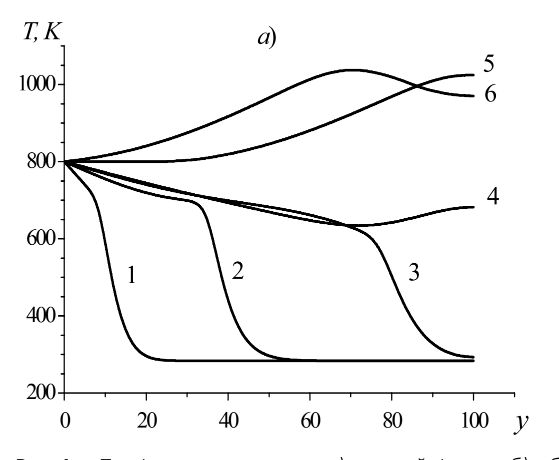
$$R_{56} = \frac{2 M_{\mathrm{H}_2\mathrm{O}}}{M_{\mathrm{CH}_4}} R_{\mathrm{CH}_4} + \frac{M_{\mathrm{H}_2\mathrm{O}}}{M_{\mathrm{H}_2}} R_{\mathrm{H}_2}, \quad sR_{56\mathrm{C}} = R_L.$$

Здесь v – скорость фильтрации; α_G, α_{C}, α_S – доля газообразных продуктов, кокса и золы при пиролизе; M_5 – молекулярная масса газовой фазы; индекс 5 приписывается величинам, характеризующим газовую, а c – конденсированную фазу; k – коэффициент проницаемости пористого слоя; T_S, T – температура конденсированной фазы и газа в порах; E_P, E_L, E_{C}, E_{CO}, E_{H_2}, E_{CH_4}, k_P, k_L, k_{C}, k_{CO}, k_{H_2}, k_{CH_4} – энергии активации и предэкспоненциальные множители реакций пиролиза древесины, испарения воды гетерогенной и гомогенных реакций окисления C, CO, H_2 и CH_4 соответственно; R – универсальная газовая постоянная; D_α, $\lambda_{5\alpha}$, c_α, $M_{5\alpha}$ – коэффициент молекулярной диффузии, теплопроводности, массовая концентрация и молекулярная масса α-компоненты, параметр с индексом α=1 соответствует O_2, α=2 – CO, α=3 – CO_2, α=4 – H_2, α=5 – CH_4, α=6 – H_2O, α=7 – N_2; p – давление газообразных продуктов в порах; $P=p/p_H$ – безразмерное давление; p_H – характерное давление; $A_S=\alpha_1 s$ – объемный коэффициент теплоотдачи; s – удельная поверхность пор; $q_R=\varepsilon_S \sigma T_S^4$ – радиационный поток от внешней стенки печи в окружающую среду; ε_S – степень черноты; t – время; $y=z/l_*$ – безразмерная пространственная переменная, z – размерная

пространственная переменная, направленная по оси печи; α_1, α_2 – коэффициенты теплоотдачи, характеризующие конвективный теплообмен во входном (выходном) сечении и на внешней стенке печи; $l_* = \sqrt{(\lambda_1 R T_*^2 \exp(E_{CO}/RT_*)/(\rho_1 k_{CO} q_{CO} E_{CO}))}$ – масштаб длины; T_* – характерная температура; $\varphi_0=(r_1^2-r_0^2)/r_0^2$, r_1 – наружный, r_0 – внутренний радиус печи; ρ_0, c_{p0}, λ_0 – плотность, теплоемкость и теплопроводность стенки печи; ρ_i, c_{pi}, λ_i, φ_i – плотность, теплоемкость, коэффициент теплопроводности и объемная доля древесины (i=1), воды (i=2), кокса (i=3), золы (i=4) и газовой фазы (i=5); λ_5, λ_R, λ_S – коэффициенты молекулярной и лучистой теплопроводности газовой фазы и коэффициент теплопроводности конденсированной фазы; σ – постоянная Стефана-Больцмана; μ – коэффициент динамической вязкости; β – константа в квадратичном законе фильтрации; g – ускорение свободного падения; $u=v/v_*$ – безразмерная скорость, масштаб скорости $v_*=0{,}797\cdot10^{-3}$ м/с; масштаб длины $l_*=0{,}95\cdot10^{-3}$ м.

Краевая задача (1–11) решалась численно. Технология решения задачи вида (1–11) с использованием итерационно-интерполяционного метода [3] приведена в работах [4, 5]. Кинетические параметры процессов сушки, пиролиза и горения, а также теплофизические коэффициенты газообразных компонентов и конденсированных фракций были взяты из работ [6–13].

Результаты расчетов и их анализ. При численном решении задачи были найдены низко- и высокотемпературный режимы горения, и режим тления. Эти режимы зависят от условий тепломассообмена пористого слоя с продуваемым через него окислителем. Низкотемпературный режим реализуется при слабом вдуве не очень горячего окислителя. Профили температуры и объемной доли влаги при низкотемпературном горении для шести моментов времени, представлены на рис. 1. Данный режим горения был получен при T_E=800 K и $\Delta P=P_E-P_H$=0,005 (Δp=500 Па). Здесь кривые 1–3 рис. 1, *а*, соответствуют процессу сушки, а кривые 4–6 процессу образования и распространения волны горения. Из данного рисунка следует, что при рассматриваемых условиях зажигание происходит на тыльной стороне слоя, а затем волна горения распространяется против потока. На рис. 1, *б,* приведены профили объемных долей воды для тех же моментов времени.



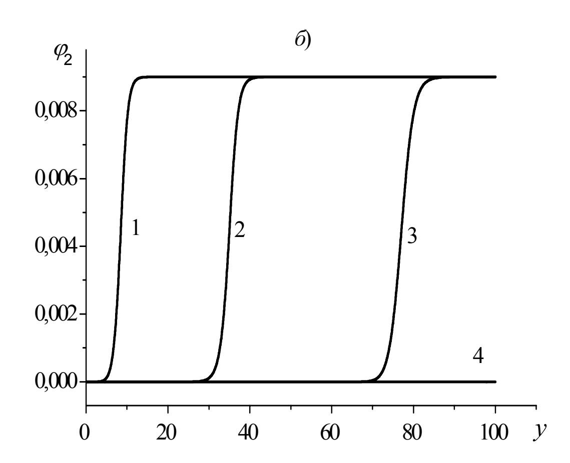
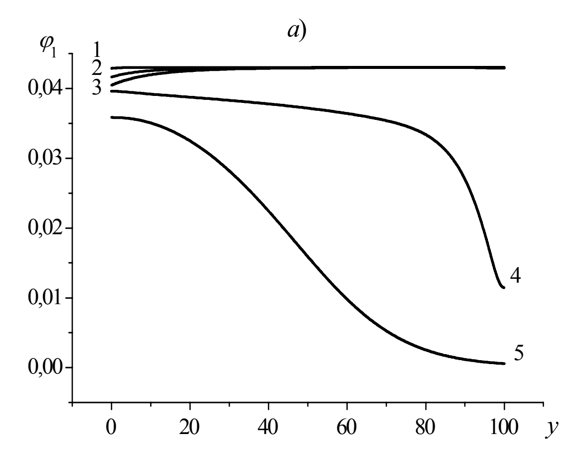


Рис. 1. *Профили температуры: а) газовой фазы и б) объемной доли влаги в моменты времени t, с: 1) 4,8; 2) 56,9; 3) 145,1; 4) 311,7; 5) 390,3; 6) 482,1*



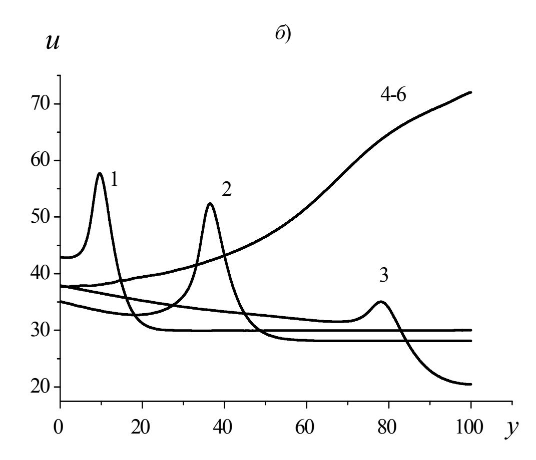


Рис. 2. *Профили: а) объемной доли отходов деревообработки и б) скорости фильтрации в моменты времени t, соответствующие рис. 1*

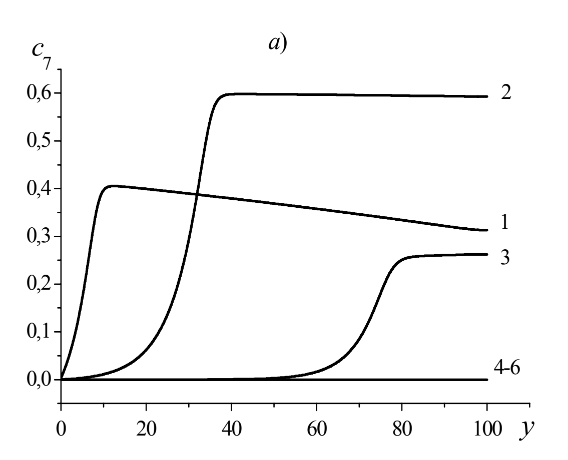
Анализируя данный рисунок, видим, что к моменту времени соответствующему кривой 4 рис. 1, *а*, объемная доля влаги равна нулю во всем объеме, после чего происходит зажигание.

Профили объемной доли исходного конденсированного вещества приведены на рис. 2, *а*, который подтверждает описанный выше механизм зажигания и горения отходов деревообработки. Здесь кривые 1–5 соответствуют кривым 1, 3–6, рис. 1, *а*. Видим, что топливо зажигается с тыльной стороны ($z=h$), и горение распространяется в направлении, противоположном направлению вдува горячего окислителя. На рис. 2, *б*, изображены профили скорости фильтрации для моментов времени, соответствующих кривым 1–3 и 6, рис. 1, *а*. В зоне испарения скорость фильтрации имеет локальный максимум (кривые 1–3), а затем после высушивания слоя профиль скорости становится монотонно возрастающим (кривая 4, рис. 2, *б*).

Из анализа кривых 1–4, рис. 3, *а*, которые соответствуют кривым 1–4, рис. 1, *а*, можно заключить, что к моменту зажигания в порах топлива пары воды отсутствуют.

На рис. 3, *б* представлены профили массовой концентрации в моменты времени, соответствующие кривым 1, 3 и 6, рис. 1, *а*, т. е. кривые 1 и 2 соответствуют процессу сушки, а кривая 3 – моменту распространения волны низкотемпературного горения. При перепаде давления $\Delta P=0{,}005$ и температуре $T_E=1000$ *K* реализуется также низкотемпературный режим горения. Но в отличие от предыдущего низкотемпературного режима волна горения распространяется в направлении движения потока окислителя.

Высокотемпературный режим горения реализовывается при более высокой скорости продувки, например, взяв $\Delta P=0{,}05$, а температуру вдуваемого окислителя T_E – 1000 K. На рис. 4, *а*, приведено пространственное распределение температуры при данном режиме горения для четырех моментов времени: прогрева (кривая 1), образования (кривая 2) и распространения (кривые 3, 4) волны горения. Пространственные распределения перепада давления для данного режима горения изображены на рис. 4, *б*. Здесь кривая 1 соответствует стадии прогрева, 2 – моменту образования, 3 – началу распространения волны горения.



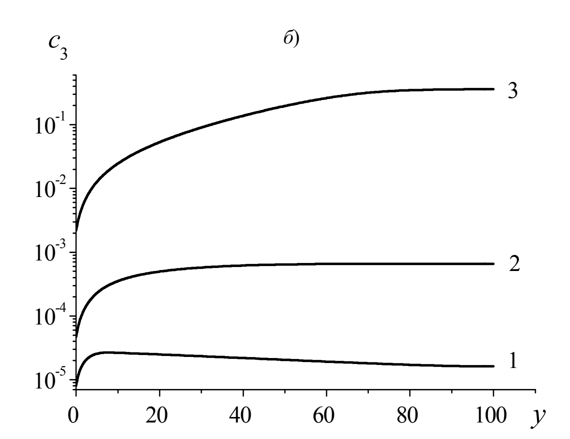
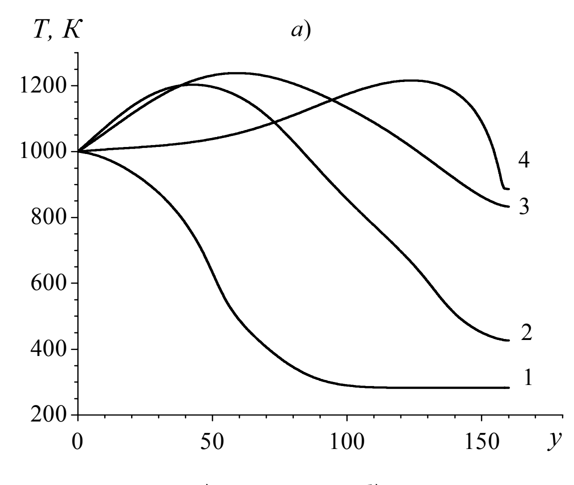


Рис. 3. *Пространственные распределения: а) массовых концентраций паров воды и б) диоксида углерода в моменты времени, соответствующие рис. 1, а*



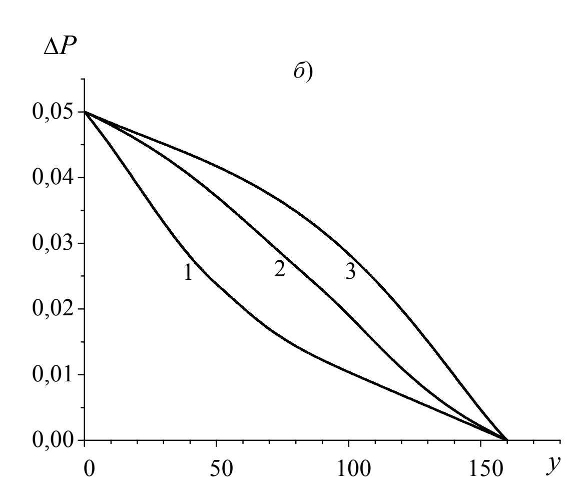


Рис. 4. *Профили: а) температуры и б) давления для моментов времени t, с: 1) 13,9; 2) 54,4; 3) 81,7; 4) 139,2*

Профили массовой концентраций CO для высокотемпературного режима приведены на рис. 5, *а*. Здесь кривые 1, 2 соответствуют стадиям прогрева и образования, а кривые 3, 4 моментам распространения волны горения. В силу того, что профили массовых концентраций остальных компонентов имеют качественно такой же вид, то они не приведены. Изменения объемной доли кокса, образующегося при прогреве, воспламенении и горении, представлены на рис. 5, *б*.

Представляет интерес режим тления, при котором происходит сушка и пиролиз твердого топлива, а затем окисление коксового остатка вплоть до золы, при этом температура в сжигаемом слое не превышает температуры вдуваемого окислителя. Данный режим реализуется, например, если $P_E-P_H=0{,}1$ ($\Delta p=10^4$ Па) и $T_E=800$ *K*, т. е. при интенсивном вдуве не очень горячего окислителя. На рис. 6, *а*, приведены профили температуры в разные моменты времени. Здесь кривые 1–3 соответствуют стадии сушки и пиролиза, а кривая 5 соответствует моменту времени, начиная с которого твердое топливо полностью высушено. На рис. 6, *б*, показано, что при тлеющем режиме сжигания не только идет процесс сушки и пиролиза древесных отходов с образованием кокса, но происходит и окисление кокса. Здесь кривые 1–3 соответствуют стадии прогрева и начала пиролиза. Затем (см. кривые 4 и 5, рис. 6, *б*) в окрестности входного сечения печи начинается реакция низкотемпературного окисления древесного угля, и объемная доля кокса начинает уменьшаться.

На рис. 7, *а*, изображены профили скорости фильтрации, из которых следует, что профиль скорости, пока не испарилась влага, является нелинейным. Здесь кривые 1–4 соответствуют процессу сушки (кривым 1–4, рис. 6, *а*), а кривая 5 соответствует кривой 6, рис. 6, *а*. И, наконец, на рис. 7, *б*, приведены профили давления вдоль оси реактора. Кривые 1 и 2 данного рисунка соответствуют начальной стадии процесса, т. е. кривым 1 и 2, рис. 6, *а*, кривая же 3 соответствует кривой 5, рис. 6, *а*. Следует отметить, что пока идет процесс сушки и интенсивное выделение водяного пара, профиль давления также нелинейный и становится линейным только после просушивания пористого слоя топлива.

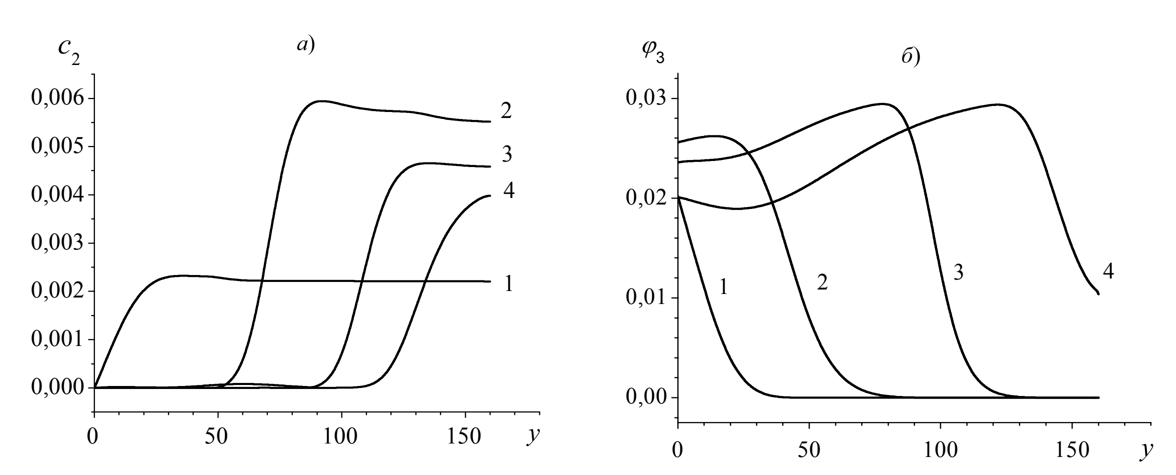


Рис. 5. *Профили: а) массовой концентрации оксида углерода и б) объемной доли кокса в моменты времени t, с: 1) 13,9; 2) 54,4; 3) 81,7; 4) 139,2*

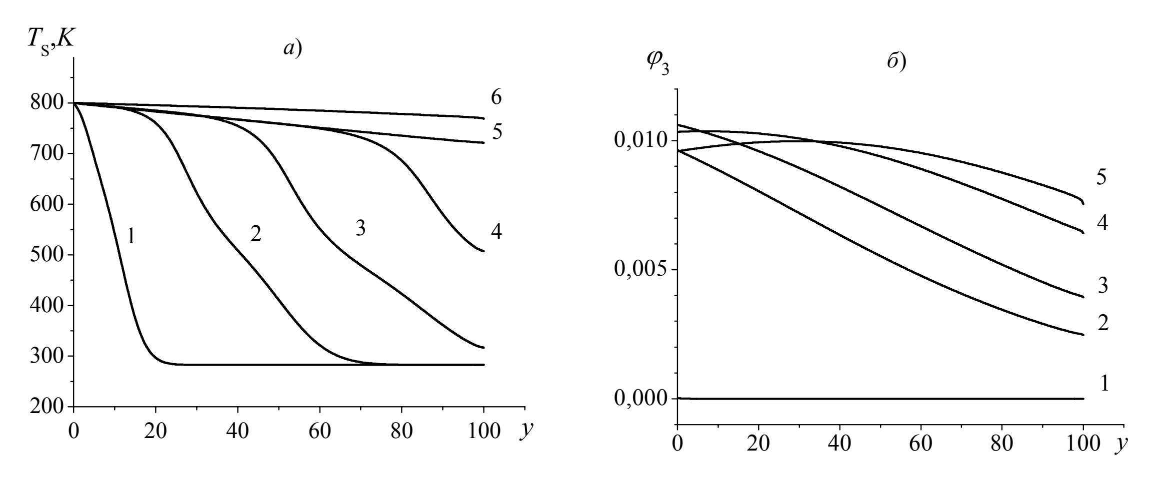


Рис. 6. *Профили: а) температуры и б) объемной доли кокса в моменты времени t, с: 1) 1,2; 2) 5,1; 3) 11,4; 4) 21,9; 5) 79,3; 6) 747*

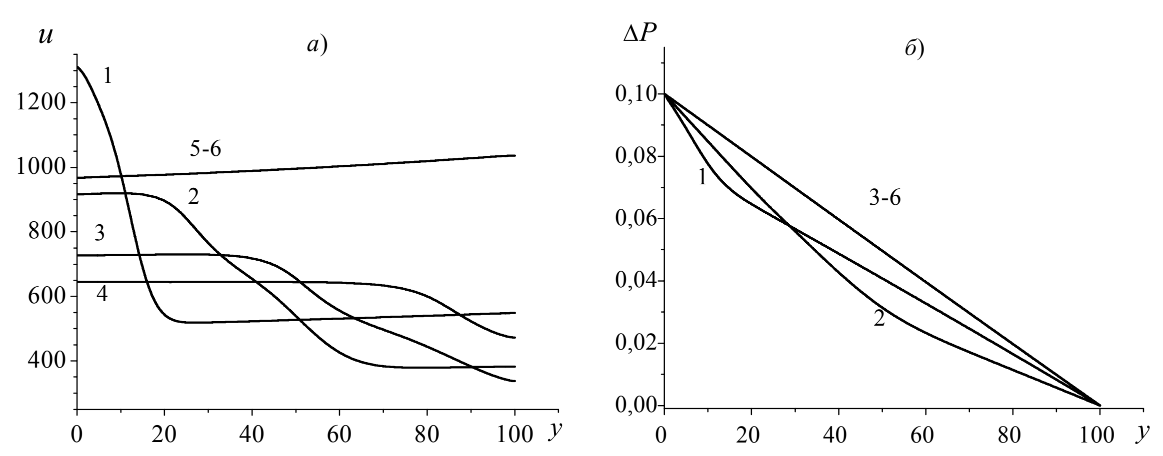


Рис. 7. *Пространственное распределение: а) скорости фильтрации и б) давления в порах топлива для режима тления в моменты времени, соответствующие рис. 6, а*

Следует отметить, что достоверность численного алгоритма используемого в данной работе исследовалась ранее в [5], где в качестве пористого коксующегося топлива брался торф. Численные расчеты работы [5] хорошо согласовывались по температуре и скорости горения торфа с экспериментальными данными работы [14]. Остальные характеристики в экспериментальной работе не определялись.

Выводы

- Показана возможность реализации различных режимов воспламенения и горения отходов деревообработки в зависимости от перепада давления (скорости продувки) и температуры продуваемого окислителя.
- Установлено, что при определенных условиях реализуется режим тления, при котором газообразные продукты пиролиза выбрасываются в атмосферу, не сгорая.
- Рассмотренную в данной работе математическую модель можно использовать при оценке состава газообразных продуктов горения пористых коксующихся топлив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Моделирование и оптимизация процессов высокотемпературной утилизации промышленных отходов // Третий Сибирский конгресс по промышленной и индустриальной математике: Тез. докл. – Новосибирск: Изд-во Института механики СО РАН, 1998. – Ч. 5. – С. 123–124.
2. Исаков Г.Н., Субботин А.Н. Тепломассообмен при высокотемпературной утилизации отходов деревообработки в вертикальном цилиндрическом реакторе Тепломассообмен ММФ-2000 // Тепломассообмен в энергетических устройствах. IV Минский Международный форум. – Минск: ИТМО НАНБ, 2000. – Т. 10. – С. 418–427.
3. Гришин А.М., Зинченко В.И. и др. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. – 318 с.
4. Звягильская А.И., Субботин А.Н. Влияние влагосодержания и тепло- и массообмена с окружающей средой на критические условия возникновения очага низового пожара // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32. – № 5. – С. 99–106.
5. Субботин А.Н. Влияние тепломассообмена на критические условия зажигания и горения торфяника // Сибирский физико-технический журнал. – 1992. – № 6. – С. 133–137.
6. Исаков Г.Н. Тепломассоперенос и воспламенение в гетерогенных системах. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 142 с.
7. Исаков Г.Н., Касьянов Г.С. Влияние процессов испарения на зажигание влажной древесины в потоке газообразного окислителя // Физика горения и взрыва. – 1986. – Т. 22. – № 2. – С. 17–24.
8. Щетинков Е.С. Физика горения газов. – М.: Наука, 1965. – 739 с.
9. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, Н.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976. – Т. 2. – 896 с.
10. Перелыгин Л.М. Древесиноведение. – М.: Советская наука, 1957. – 252 с.
11. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.
12. Краткий справочник физико химических величин / Под ред. К.П. Мищенко и А.А. Равделя. – Л.: Химия, 1967. – 182 с.
13. Померанцев В.В. и др. Основы практической теории горения. – Л.: Энергия, 1986. – 309 с.
14. Борисов А.А., Борисов Ал.А., Горелик Р.С. Экспериментальные исследования и математическое моделирование торфяных пожаров // Теплофизика лесных пожаров / Под ред. В.Е. Накорякова. – Новосибирск: Наука, 1984. – С. 5–12.